Pascals Barometer

Marc Eyer

1. Zusammenfassung

Warum läuft das Wasser nicht aus dem Glas, das verkehrt aus dem Waschbecken gehoben wird? Ist dafür das Vakuum verantwortlich oder der Luftdruck und wenn ja, was ist das überhaupt? Ein einfaches Alltagsphänomen entführt die Schüler im Lehrstück „Pascals Barometer“ tief in die Wissenschaftsgeschichte des 17. Jahrhunderts. Unter der Führung bedeutender Wissenschaftler (Galilei, Torricelli, Pascal, von Guericke) ergründen die Schüler das Rätsel um das Phänomen und ringen gemeinsam mit den Wissenschaftlern mit der Vorstellung des „Horror Vacui“ und dem Paradigma des Luftdrucks.

2. Pascals Sternstunde

Die Entdeckung des Luftdrucks kann historisch ins 17. Jahrhundert gelegt werden (Simonyi 2004). In rascher Folge gelangten in dieser Zeit Beschreibungen von Experimenten und Erklärungen zu Phänomenen in die wissenschaftliche Öffentlichkeit und regten manchen Wissenschaftler dazu an, darüber nachzudenken. Die aristotelische Lehre über die Unmöglichkeit des Vakuums (Theorie „horror vacui“) wurde schon durch Galilei kritisiert und durch Experimente widerlegt. Bekannt war aus der Bewässerungstechnik längst die beschränkte Anwendbarkeit von Saugpumpen, die nicht in der Lage waren, eine grössere Höhendifferenz als rund 10 Meter zu überwinden. Wo lagen die Gründe dafür? Ist es die Kraft des Vakuums, die beschränkt ist? Licht in die diffusen Vorstellungen über die Wirkung von Vakuum, über das Verhältnis zwischen „Saugen“ und „Drücken“ sowie die Gewichtskraft der Lufthülle und allfälliger Auswirkungen davon brachten die Experimente von Torricelli. Er experimentierte mit Quecksilbersäulen, die er in Glasrohren aus Quecksilberbäder zu ziehen versuchte. Er stellte fest, dass die Quecksilbersäulen immer bei einer bestimmten Höhe abrissen und im Gefäss einen „Leerraum“ zurückliessen. Während noch Galilei damit argumentierte, dass das darüber entstehende Vakuum nur eine bestimmte begrenzte „Haltekraft“ hätte (z. B. Mach 2006), prägte Torricelli ein Paradigma, das nur durch den Geist der neuen Selbstwahrnehmung der Menschen in dieser Zeit möglich war. *„Noi viviamo sommersi nel fondo d’un pelago d’aria elementare“* (Walker 2007) – „Wir alle leben am Grunde eines Meeres aus Luft“. Dieses Bild, das sichtbar wird, wenn die anthropozentrische Sichtweise aufgegeben und die Situation aus der Astronautenperspektive betrachtet wird, hat Torricelli davon überzeugt, dass der Druck, der auf den Menschen lastenden Lufthülle die von ihm untersuchten Phänomene erklärt. Diese Sichtweise erforderte ein Standpunktwechsel, ein Lösen von der anthropozentrischen Sichtweise hin zu einer geozentrischen. Dass uns dieser Sichtwechsel heute trotz Globus, Satelliten- und Astronauten-Bildern der Erde immer noch beliebig schwer fällt zeigt, dass sich das Luftdruckkonzept bis heute nicht im Alltag verankert hat. Niemand stellt sich vor, dass beim „Saugen“ an einem Strohhalm die Luft aussen uns das Getränk in die Mundhöhle schiebt!

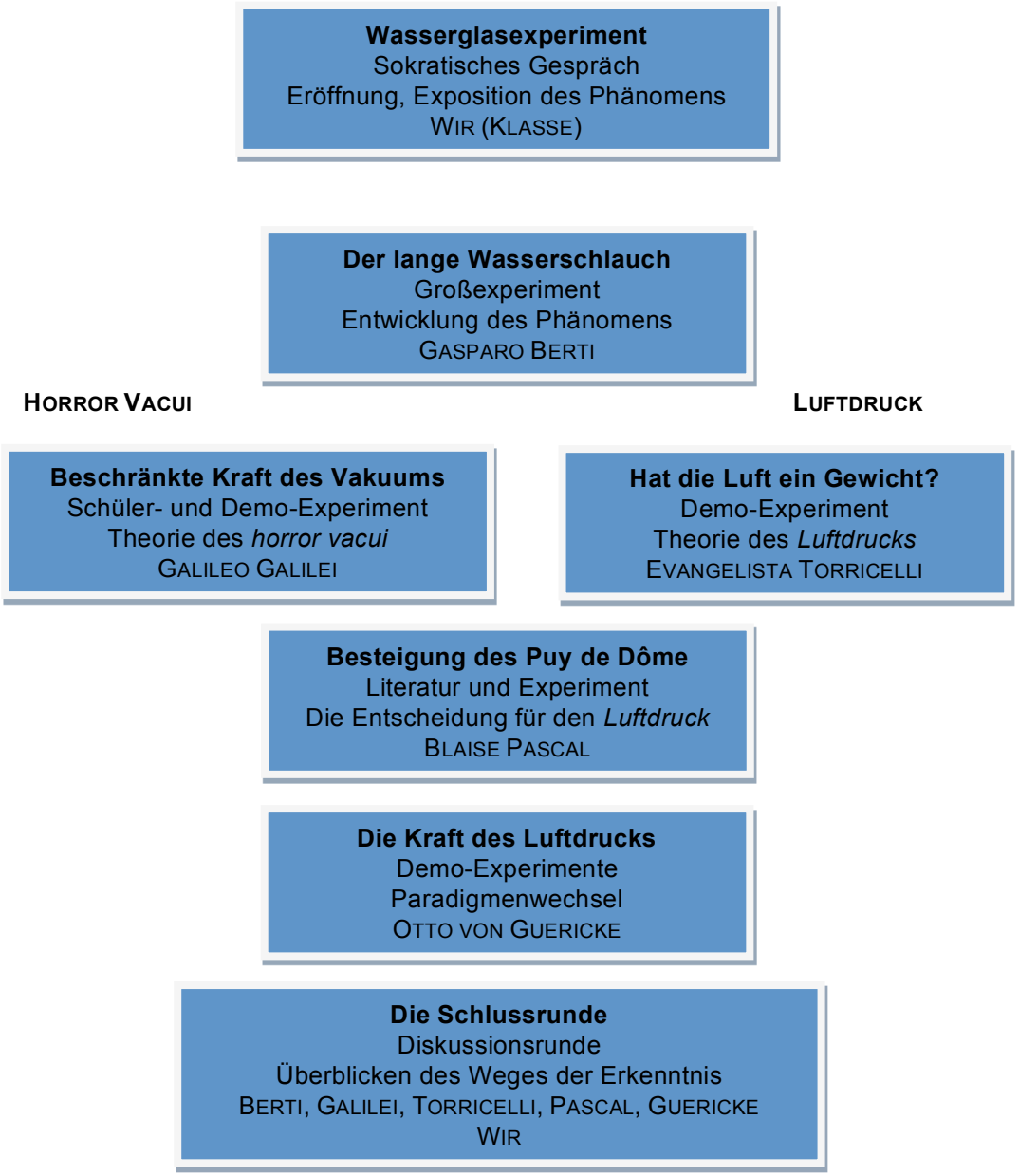
Luft hat Masse und die ganze Lufthülle damit eine Gewichtskraft. Diese lastet auf uns allen und macht, dass die Luft sofort versucht alle Leerstellen auszufüllen. Dies versucht sie mit enormem Druck, dessen Gewalt uns fremd ist. Aber genau so fremd ist uns dessen Endlichkeit und Begrenztheit. Diese beiden Einsichten, dass es erstens den leeren Raum gibt, dieser aber durch den Druck der Lufthülle mit grosser Gewalt zu verhindern versucht wird und zweitens, dass dieser Druck eben auch Grenzen hat (so kann er eine Wassersäule nicht mehr als 10 Meter heben) ist eine Sternstunde in der Geschichte wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Die Art und Weise der Entdeckung des Luftdrucks ist gleichsam ein Lehrstück in wissenschaftlicher Forschung. Das bilden von Hypothesen, Entwickeln und Weiterentwickeln von Experimenten, Überprüfen, Verwerfen oder Anpassen von Hypothesen und schließlich das Einbinden von gewonnener Erkenntnis in eine neue Theorie ist an diesem Beispiel exemplarisch.

3. Die Erforschung des Luftdrucks als Unterrichtseinheit – ein Lehrstück

Das Lehrstück Pascals Barometer gründet auf einer Unterrichtsvorlage von Martin Wagenschein (Wagenschein 2002), die in ersten Fassungen von Ueli Aeschlimann und Hans Christoph Berg (Aeschlimann 1997) ausgearbeitet wurde. Die Weiterentwicklung dieser Unterrichtsvorlagen zum Lehrstück „Pascals Barometer – frei nach Martin Wagenschein" wurde 2013 publiziert (Eyer/Aeschlimann 2013). In der folgenden Übersicht sind die einzelnen Unterrichtssequenzen (Akte) des Lehrstücks dargestellt. Diese sind zeitlich unterschiedlich umfassend. Diese verschiedenen Einheiten werden im folgenden Kapitel ausführlicher beschrieben. Die Beschreibungen sind zum Teil wörtlich der erwähnten Publikation Eyer/Aeschlimann (2013) entnommen.

Übersicht



4. Kurzbeschreibung der einzelnen Akte

Eröffnung – Das Experiment mit dem Wasserglas

Den Beginn folgt dem sogenannten sokratischen Gespräch, für welches das Bild von Martin Wagenschein mit seinen Studierenden exemplarisch geworden ist (vgl. Abb. 1). Im Fokus steht das Experiment mit dem Wasserglas, das den Schülern möglichst nahe und anschaulich exponiert wird. Dazu gruppiert sich die Klasse um einen Tisch, auf dem ein zu drei Vierteln mit Wasser gefülltes Waschbecken und ein hohes Trinkglas (Bierglas) bereitgestellt sind. Die Schüler müssen so stehen oder sitzen, dass sie alle bequem auf das Wasserbecken blicken und in dieser Position auch einige Zeit ausharren können. Die Lehrperson beginnt nun in der Art Wagenscheins etwa so: „Sie haben alle schon mal Gläser gespült, nicht? Ist Ihnen diese eigenartige Tatsache dabei auch schon mal aufgefallen?" Die Lehrperson taucht das Glas vollkommen ins Wasserbecken und zieht es vorsichtig, die Öffnung des Glases immer unter Wasser, verdreht aus dem Wasserbecken. Das Wasser kommt mit, fliesst nicht aus dem Glas, obwohl es die Wasseroberfläche des Wassers im Waschbecken längst überstiegen hat. „Was ist da los? Warum läuft das Wasser nicht aus dem Glas ins Becken?" Aus diesem erstaunlichen, jetzt wiederentdeckten Alltagsphänomen entwickelt sich die ganze erste Unterrichtssequenz. Die Schüler erkunden das Phänomen mit Fragen, mit aufgestellten und wieder verworfenen Hypothesen so umfassend, dass nach der Sequenz alle intrinsisch daran interessiert sind, dem Sachverhalt des Phänomens auf den Grund zu gehen.

Abbildung 1: Martin Wagenschein beim Bierglas-Experiment im Sokratischen Gespräch mit Lehrpersonen.

Im Verlaufe des Gespräches tauchen Vorschläge zur Erweiterung des Experiments auf. Einigen kann spontan nachgegangen werden, andere erfordern etwas Vorbereitungszeit. So zum Beispiel das Experiment mit dem langen Schlauch, mit dem untersucht werden soll, wie hoch denn eine Wassersäule „aus einem Becken" gezogen werden kann (vgl. folgendes Kapitel „Der lange Wasserschlauch"). Vor allem aber tauchen während des Gesprächs zwei Erklärungsansätze für das Phänomen auf: Das Konzept „*horror vacui*" und das Konzept des *Luftdrucks*. Beide Konzepte werden durch die Schüler in verschiedenen Ansätzen mehrmals formuliert. *Luftdruck*: „Der Druck durch die Aussenluft auf das Wasser im Becken verhindert ein Ausfliessen des Wassers aus dem Glas!" *Horror vacui:* „Die Natur lässt kein Vakuum zu oder versucht zumindest, es heftig zu verhindern. Was sollte denn im Glas sein, wenn das Wasser herausfliesst?"

Der lange Wasserschlauch

In der zweiten Sequenz widmet sich die Klasse dem Wasserschlauchexperiment. Die Idee dazu wurde im Verlaufe des sokratischen Gesprächs in der Klasse entwickelt.
Die Schüler helfen einander gegenseitig, das eindrückliche Experiment durchzuführen. Ein vollkommen mit Wasser gefüllter transparenter Schlauch von etwa zwölf Metern Länge liegt aufge-

rollt in einem mit Wasser gefüllten Becken. Das eine Ende liegt offen im Becken, das andere ist fest verschlossen. Am geschlossenen Ende wird eine lange Schnur befestigt, womit der Schlauch dann im Treppenhaus nach oben gezogen werden kann. Zwei Schüler sind unten besorgt, das offene Ende des Schlauchs im Becken unter Wasser zu halten. Die anderen ziehen den Schlauch im Treppenhaus hoch; das Wasser steigt mit. Bei etwa zehn Metern bleibt aber das Wasser plötzlich stehen und Blasen bilden sich im Wasser. Warum bleibt das Wasser stehen? Woher kommen die Blasen im Wasser? Was ist im entstehenden Raum über dem Wasser?

Das Experiment bildet eine Etappe auf dem Weg zur Klärung der Frage, mit welcher der beiden Theorien das Phänomen erklärt werden soll. Abschließende Erklärungen sind in diesem Stadium weder für das Wasserschlauchexperiment noch für das Phänomen Wasserglas gefragt. Die Beobachtungen werden aber festgehalten: „*Das Wasser löst sich bei etwa zehn Metern vom Schlauchende, das Wasser bleibt stehen. Das Wasser bringt Blasen hervor. Es bildet sich ein Leerraum über dem Wasser. Beim Herunterlassen des Schlauchs füllt sich der Leerraum wieder mit Wasser*."

Nach der erfolgreichen Durchführung des Experiments werden die Schüler damit konfrontiert, dass sie mit ihren Ideen und Vorstellungen nicht alleine stehen, sondern sich einreihen in die Geschichte der Wissenschaft. *Gasparo Berti* hatte in den Strassen Roms um 1640 mit zehn Meter hohen Glasrohren und Wasser experimentiert und das gleiche Phänomen studiert.

Die beschränkte Kraft des Vakuums

In der folgenden Lektion setzt sich die Klasse mit der Lektüre von Galileis „Discorsi" auseinander (Galilei 2004/1638). Er beschreibt darin seine Theorie der „beschränkten Kraft des Vakuums". Zwar ist er anders als etwa die Aristoteliker der Meinung, dass es durchaus ein Vakuum (die Leere) gibt, allerdings muss zur Erzeugung einer solchen Leere eine Kraft aufgewendet werden. Die Kraft des Vakuums, mit der dieses sich selbst zu verhindern versucht, kann gemessen werden. Die Schüler messen sie: Mit Plastikspritzen und Wasser erkunden sie „das Vakuum". Füllt man die Spritze zur Hälfte mit Wasser und verschließt die Spritzenöffnung vorne mit dem Daumen, so lässt sich durch kräftiges Ziehen der Kolben etwas herausziehen. Erneut die Frage: Was bleibt im sich öffnenden Raum? Leere? Wasserdampf? Luft, die sich aus dem Wasser «gelöst» hat? Die Schüler entdecken selber, dass der Kolben der Spritze blitzschnell zurückschnellt, wenn sie diesen loslassen. Der Leerraum verschwindet augenblicklich. Kann sich aus dem Wasser ausgetretene Luft so rasch wieder im Wasser „verkriechen"? Vorerst bleibt die Hypothese im Raum stehen, dass sich beim Ziehen des Kolbens tatsächlich ein luftleerer Raum bildet.
Die Klasse folgt nun der Beschreibung Galileis zur Bestimmung der Kraft, die nötig ist, um ein Vakuum zu erzeugen. Dazu wird ein Ausschnitt aus den „Discorsi" gelesen, in welchem der Protagonist *Salviati* seinen Kollegen *Sagredo* und *Simplicio* das Experiment erklärt.

Die Resultate aus den Experimenten werfen neue Fragen und Unsicherheiten auf: Warum spielt es für die Kraft keine Rolle, *wie viel* Vakuum erzeugt wird? Warum hängt die Kraft andererseits davon ab, welche Querschnittsfläche die Spritze (das Vakuum) hat?

Hat die Luft ein „Gewicht"?

Die Theorie des „horror vacui" wird vorläufig so stehengelassen und die Klasse wendet sich wieder der Frage nach dem Luftdruck zu: Wenn der Luftdruck das Ausfließen des Wassers aus dem Glas verhindern soll, so muss die Luft ja ein beträchtliches Gewicht haben, um einen so großen Gegendruck zu erzeugen. Schon fast als Selbstverständlichkeit wird hier angenommen, dass die Luft tatsächlich eine Gewichtskraft hat. Ist das wirklich so? Und wenn ja, wie groß ist diese? Ist es möglich, sie zu messen?
Wiederum liegt bei Galilei die Beschreibung eines Experiments vor, wie die Gewichtskraft der Luft gemessen werden kann. Das Experiment lässt sich, genau wie beschrieben, mit geringem

Aufwand durchführen. Die Klasse bestimmt so die Dichte der Luft. Um die Bedeutung dieses Resultates zu konkretisieren, werden als Beispiel die Masse und die Gewichtskraft der Luft im Schulzimmer berechnet. Das Resultat beeindruckt! Die Luftdrucktheorie rückt dadurch in ein neues Licht. Luft kann also eine beträchtliche Kraft auf die Umgebung ausüben. Sofort wirft das Ergebnis aber auch neue Fragen auf: Wie ertragen wir Menschen die Gewichtskraft der ganzen Luft? Wie viel Luft gibt es denn in der ganzen Atmosphäre?

Im Unterricht taucht eine weitere historische Persönlichkeit auf, die vorgeschlagen hat, die Wassersäule im Glas durch eine solche aus Quecksilber zu ersetzen: *Evangelista Torricelli*. Quecksilber hat eine deutlich größere Dichte als Wasser und eine Quecksilbersäule sollte daher die Kraft des Vakuums bzw. die Kraft des Luftdrucks bereits bei geringerer Mächtigkeit überwinden.
Im Unterricht wird ein altes Quecksilber-Barometer studiert. Es funktioniert genau nach dem Prinzip des Wasserglas- bzw. des Wasserschlauchexperimentes, mit dem Unterschied, dass die Quecksilbersäule bereits bei etwa 73 Zentimetern eine Gewichtskraft hat, die ausreicht, um die „Kraft des Vakuums zu überwinden" bzw. den entgegenhaltenden Luftdruck auszugleichen. Torricelli war ein vehementer Verfechter der Luftdrucktheorie. Aufgrund einer Vielzahl verschiedener Experimente, die er mit Quecksilbersäulen gemacht hat, ist er zu der Überzeugung gekommen, dass die Theorie des „horror vacui" eine falsche Vorstellung der Gegebenheiten schafft. Torricelli zeichnete ein eindrückliches Bild seiner Sichtweise: „Wir Menschen leben am Grunde eines Meeres aus Luft!" (Walker 2007). Alle bisher beschriebenen Effekte seien zurückzuführen auf den Schweredruck der immensen Luftsäule, an deren Grund wir leben.

Die Besteigung des Puy de Dôme

Die Quecksilbersäule und die Experimente von Torricelli erbrachten noch keinen Beweis für die Wirkung des Luftdrucks. Dazu bedurfte es in der Entdeckungs-Geschichte des Luftdrucks eines weiteren genialen Kopfs: *Blaise Pascal*. Im Jahre 1647 beauftragte dieser seinen Schwager Périer mit einem Experiment: Er solle mit einem mit Quecksilber gefüllten Rohr, wie es Torricelli für seine Experimente verwendet hatte, von Clermont-Ferrand aus auf den Puy de Dôme steigen und dabei genau den Pegel der Quecksilbersäule beobachten. Falls der Luftdruck bei dem Experiment eine Rolle spielte, sollte sich beim Besteigen des Berges etwas verändern, da ja der Luftdruck auf dem Berg geringer sein würde als in Clermont-Ferrand.
Der Originaltext des Briefwechsels wird den Schülern vorgelegt. Es wird eine vereinfachte (aber immer noch in französisch verfasste) Zusammenfassung davon gelesen, bereit steht auch die vollständige deutsche Übersetzung. Auch dieses Experiment, das historisch den Durchbruch in der Frage nach der Bedeutung des Luftdrucks gebracht hat, soll im Unterricht inszeniert werden. Zwar gibt es an der Schule keine geeigneten Instrumente, um das Experiment am nahegelegenen Hausberg wandernd nachzuvollziehen (das Quecksilberbarometer ist viel zu labil und zu schwer, um damit umherzuwandern). So führen wir das Experiment im Schulhaus selber durch, wo wir einen Höhenunterschied von etwa 20 Metern überwinden können. Das Experiment scheint den Beweis zu erbringen. Der Pegel im Rohr sinkt um etwa 2 mm (bei Pascal waren es etwa 9 cm)!
Die Schüler sollen jeder für sich schriftlich ausformulieren, welche Erkenntnis das Experiment von Pascal gebracht hat.

Die Kraft des Luftdrucks

Otto von Guericke tritt als letzter der Wissenschaftler im Unterricht in Erscheinung. Er brachte die Kunst der öffentlichen Inszenierung naturwissenschaftlicher Experimente auf einen neuen Höhepunkt. Seine Faszination für die neuen Erkenntnisse rund um den Luftdruck schwappt rasch auf die Schüler über. Attraktive Experimente und Guerickes Erfindung der Luftpumpe machen die Wirkung und die Macht des Luftdrucks erfahrbar. Es lohnt sich hier, eine Lektion lang mit einer Vakuumpumpe zu experimentieren und zu spielen: Das Zentrum bilden die Magdeburger Halbkugeln, und dazu gehört blühend erzählt die Geschichte der Inszenierung des Experi-

mentes durch Guericke in Magdeburg. Ferner wird das Verhalten von verschiedenen Dingen unter der Vakuumglocke untersuch: ein Ballon, ein Glas Wasser, ein Schokokuss usw.

Die Schlussrunde

Den letzten Höhepunkt der Wanderung durch die Wissenschaftsgeschichte bildet die abschließende Gesprächsrunde mit den fünf Wissenschaftlern *Berti, Galilei, Torricelli, Pascal* und *von Guericke*. Sie soll gleichzeitig einen Überblick über den vollzogenen Erkenntnisprozess geben. Die Schüler schlüpfen in die Rolle der Wissenschaftler und versuchen, aus deren Warte das Ausgangsphänomen (Wasser im Wasserglas) zu erklären. Ein aufmerksames Publikum stellt dabei kritische Fragen. Alle Experimente, die im Lehrstück eine zentrale Rolle spielen, sind nochmals präsent. Die Diskussion wird nach 40 Minuten unterbrochen. Nachdem nun Otto von Guericke die Luftpumpe erfunden hat und scheinbar klar ist, dass der Luftdruck für das Verharren des Wassers im Glas verantwortlich ist, soll dies nun auf sehr direkte Weise experimentell gezeigt werden. Dramaturgisch hat dieses abschließende Experiment die Bedeutung des „*Finales*" im Lehrstück. Eine verkleinerte Version des Beckens mit Wasserglas, ein Reagenzglas in kleinem Wassergefäß, gehalten von einem Stativ, wird unter der Vakuumglocke evakuiert. Ein ähnliches Experiment hat um 1670 auch *Robert Boyle* durchgeführt. Obwohl oder gerade weil alle zu wissen glauben, was geschehen wird, herrscht große Spannung. Und tatsächlich beginnt das Wasser aus dem Glas auszufliessen, nachdem die Vakuumpumpe eine Weile kräftig Luft abgepumpt hat!

Nachspiel

Das Lehrstück endet damit, dass die Schüler den Auftrag erhalten, in Dreier- bis Vierergruppen ein DIN-A0-Poster als Denkbild zu gestalten, auf welchem der ganze Unterricht zum Barometer und vor allem die wichtigsten Erkenntnisse, festgehalten sind.

Eine Woche später schreiben die Schüler eine Physikprüfung über den Inhalt des Lehrstücks. Da im ganzen Unterricht kaum gerechnet wurde, ist die Prüfung geprägt durch qualitative Fragestellungen. Die Schüler sollen aber auch in der Lage sein, Transferleistungen zu erbringen. So besteht eine Aufgabe zum Beispiel darin, die Funktionsweise des im Unterricht nie besprochenen *Goethe-Barometers* zu erklären.

Zwei Monate nach der Inszenierung des Lehrstücks werden die Schüler mit einem Fragebogen befragt. Sie sollen sich dazu äussern, wie ihnen das Lehrstück insgesamt und wie ihnen die unterschiedlichen Sequenzen gefallen haben. Erfragt wird aber auch, was ihnen besonders geblieben ist und ob sie die Grundfrage, um welche sich das Lehrstück gedreht hat, noch kennen. Dieses Feedback ist für eine Auswertung enorm wichtig. Sind die Lernziele mit dem Lehrstück erreicht worden? Was muss verbessert werden? Wo haben sich die Schüler gelangweilt?

5. Blitzlichter aus dem Unterricht

Im sokratischen Gespräch versucht die Lehrperson das Phänomen bestmöglich zu exponieren um die Schüler anzuregen, über ihre Vorstellungen zu erzählen und diese gegenseitig zu diskutieren (Abb. 2). Die Lehrperson hat dabei genügend Experimentiermaterial zur Hand, um spontan auf Vorschläge und Anregungen der Schüler zu reagieren (Abb. 3).

Abbildung 2: Das Sokratische Gespräch mit Schülern rund um das Experiment mit dem Wasserglas.

Abbildung 3: Das Experiment mit dem Wasserglas wird auf Vorschläge der Schüler hin erweitert.

An einer Schnur wir ein mit Wasser gefüllter Schlauch am verschlossenen Ende durch das Treppenhaus der Schule in die Höhe gezogen. Das offene Ende des Schlauchs bleibt dabei in einem gefüllten Wasserbecken untergetaucht, bewacht von zwei Schülern. Bei etwa 10 Metern bleibt das Wasser plötzlich stehen (Abb. 4).

Schüler messen nach der Vorlage Galileis die „Vakuumskraft“. Sie finden dabei heraus, dass diese von der Querschnittsfläche der Spritze abhängt, die sie dazu benützen, nicht aber etwa von der „Menge“ an erzeugtem Vakuum (Abb. 5a und 5b).

Abbildung 4: Das Experiment mit dem langen Wasserschlauch im Treppenhaus des Schulhauses.

Abbildung 5a: „Wie stark ist das Vakuum?“ Schüler experimentieren nach der Vorlage Galileis.

Abbildung 5b: Wovon hängt die Vakuumskraft ab?

In der Rolle der verschiedenen Wissenschaftler (Berti, Galilei, Torricelli, Pascal und von Guericke (nicht im Bild)) diskutieren die Schüler die Lösung des Rätsels um das Wasser, das nicht aus dem Glas läuft. Jeder Wissenschaftler argumentiert in seiner Sichtweise. Die restlichen Schüler bilden das aufmerksame Publikum und unterbrechen die Diskussion mit kritischen Fragen (Abb. 6).

Abbildung 6: Schüler diskutieren in der Rolle der Wissenschaftler über den Paradigmenwechsel vom „horror vacui“ zum Luftdruck.

Das Finale der Unterrichtseinheit bildet das Experiment von Boyle, bei welchem die Luft um das verkehrte Wassergefäss unter der Vakuumglocke evakuiert wird. Obwohl die Schüler im Prinzip wissen was geschehen wird, ist die Spannung gross. Läuft das Wasser wirklich aus dem Glas? Was geschieht, wenn man die Luft wieder dazu lässt? (Abb. 7)

Abbildung 7: „Also, ist es wirklich wahr!?“ …das Wasser läuft bei fehlendem Luftdruck aus dem Glas!

6. Didaktische und methodische Anmerkungen

Lehrstücke sind allgemein charakterisiert durch drei methodische Merkmale; sie sind dramaturgisch, exemplarisch und genetisch (Berg 2009).

Dramaturgisch
Das Lehrstück „Pacals Barometer“ haben wir in verschiedene „Akte“ eingeteilt. Dabei orientieren wir uns an der Gliederung von Werken aus der Musik oder dem Theater und geben damit dem

Lehrstück eine Dramaturgie. Bei der Komposition des Lehrstücks haben wir also den Anspruch, nicht bloss die Geschichte der Entdeckung des Luftdrucks nachzuerzählen, sondern das Drama dieser wissenschaftlichen Entdeckung nach zu inszenieren. Die Schüler nehmen dabei eine aktive Rolle ein. Sie erleben ihr eigenes Bildungs-Drama beim Nach-entdecken des Luftdrucks.
Im ersten Akt, der Eröffnung, begegnen die Schüler dem Phänomen. Diese Begegnung haben wir in der Form eines Sokratischen Gesprächs inszeniert. Das Sokratische Gespräch wird manchmal mit dem Begriff der „Mäeutik" (Hebammenkunst oder Geburtshilfe) in Verbindung gebracht. Sokrates verwendete den Begriff im didaktischen Zusammenhang, um die Rolle des Gesprächsleiters zu beschreiben. Dieser versucht durch geschicktes Fragen und lenken des Gesprächs die Erkenntnis aus dem Schüler hervorzuholen. Die Philosophie dahinter gründet auf der Annahme, dass die Erkenntnis in einem jeden schlummert und diese durch geschicktes Unterrichten an den Tag gebracht werden kann. Dadurch dass die Lehrperson das Phänomen (hier dir Tatsache, dass das Wasser nicht aus dem Glas läuft) möglichst anschaulich und prägnant (auch sprachlich) in Szene setzt, sollen die Vorstellungen und Präkonzepte zum Sachverhalt aus den Schülern evoziert, das heißt hervorgelockt werden. Anfänglich lenkt und führt die Lehrperson das Gespräch, zieht sich dann aber idealerweise immer mehr aus der Diskussion zurück und übernimmt nur noch Aufgaben der Gesprächsführung. Vor allem aber darf die Lehrperson keine Denk- und Erkenntnisprozesse abschneiden, indem sie Fragen beantwortet oder Erklärungen abgibt. Bleibt das Gespräch hängen oder steckt es in einer Sackgasse, dann kann die Lehrperson selber Inputs geben, allerdings geschieht das durch den Einbezug der Urheber der Gedankengänge z. B. in der folgenden Art: „Vor 400 Jahren hat sich ein Wissenschaftler diese Frage auch gestellt und er ist noch einen Schritt weiter gegangen: Er wollte wissen ob das Experiment auch gehe, wenn er immer mehr, d. h. ein immer grösseres Wassergefäss nehmen würde. Was meint Ihr? Funktioniert das auch?" Diese Verbindung zur Kulturgeschichte gibt dem Inhalt des Unterrichts eine neue Dimension. Die Frage mit der wir uns im Unterricht beschäftigen ist nicht eine vom Lehrer erfundene Aufgabe!
Während des gesamten Lehrstücks greifen wir immer wieder auf historische Quellen zurück. Diese Orientierung an der Kulturgenese der Erkenntnis eines Sachverhalts ist für den Erkenntnisprozess wichtig. Wir lassen uns in unseren Gedankengängen durch jene der großen Gelehrten lenken. Die Kulturauthentizität verschafft unserem Wissen eine menschheitsgeschichtliche Dimension. Oft sind Lehrpersonen mit utilitaristischen Fragen von Schülern konfrontiert: „Warum muss ich mathematisch ableiten können? Wozu muss ich französische Literatur lesen? Wo und wann brauche ich das in meinem Leben je wieder?" Die Antworten darauf liefert ein Unterricht, der kulturhistorische Bezüge schafft. Bildung bedeutet, das gegenwärtige Menschheitswissen, die gegenwärtigen Gesellschaftsnormen (Ethik, Moral, Religion, Lebensphilosophien) und auch die Staatsformen und Wissenschaftsstränge bis hin zu den Lehrplänen der Schulen in ihrer kulturhistorischen Entwicklung zu sehen. Der Schüler soll zur Erkenntnis gelangen: „Ich lebe mit meinen Gedanken, meinen Ideen, meinen Erkenntnissen und Konzepten in einer historisch gewachsenen kulturellen Gesellschaft, die mich prägt und formt und an der ich auch teilhaben und die ich mitprägen und mitgestalten kann und soll."

Exemplarisch
Entsprechend sind die Phänomene auch ausgewählt, die in Lehrstücken unterrichtet werden. Sie sollen exemplarisch sein, sollen einen Erkenntnisschritt in der (wissenschaftlichen) Menschheitsgeschichte (nach Klafki (2007): epochal typisches Menschheitsthema) aufgreifen, an dem das Gelernte auch auf andere Inhalte übertragen werden kann. Beim vorliegenden Beispiel ist das nicht weniger als das moderne naturwissenschaftliche Denken, Experimentieren und Schlussfolgern an sich. Die Entdeckung des Luftdrucks als neues wissenschaftliches Paradigma ist ein exemplarisches Stück Wissenschaftsgeschichte. Es ist exemplarisch für die Veränderung des Weltbildes in jener Epoche. Der Mensch rückt immer mehr aus dem Zentrum der Beschreibung. Die Theorien und Erklärungen entziehen sich immer mehr der direkten Anschaulichkeit. Um die Welt zu verstehen, muss der Mensch sich von seiner anthropozentrischen Sichtweise lösen, einen Schritt zurück machen, die Welt von „außerhalb" betrachten. Dann rückt das „Meer

aus Luft“ in den Blick. Plötzlich erscheint alles klar und deutlich vor dem geistigen Auge. Für unsere Schüler ist das heute deutlich einfacher als für die Menschen vor 500 Jahren. Satellitenbilder und Aufnahmen der Erde von Raumstationen sind bekannt. Schwierig geblieben ist, diese Bilder mit der eigenen Anschauung zu verbinden. Von unten an den Himmel schauen und sich gleichzeitig vorzustellen, wie das Bild „von außen“ aussieht. Jede Veränderung von Sichtweisen und Blickwinkeln erfordert Sicherheit im eigenen Standpunkt. Umgekehrt findet der Lernende nur Vertrauen in den eigenen Standpunkt, wenn er es wagt, sich zu bewegen!

Genetisch
Schließlich ist das Lehrstück immer auch ein Stück genetischen Lehrens und Lernens im doppelten Sinne. Die Schüler leisten während des ganzen Lehrstücks selber beträchtliche Erkenntnisschritte, die sie sich idealerweise selber erschließen, natürlich unter kundiger Anleitung der Akteure der Kulturgeschichte (Berti, Galilei, Torricelli, Pascal, von Guericke). Das Lehrstück ist so gestaltet, dass es für die Schüler möglich ist, individuell den Weg der Erkenntnis zu gehen, gleichzeitig folgt es aber der Kulturgenese des Inhalts. Diese Parallelführung von Individualgenese und Kulturgenese geht davon aus, dass das Erkennen und Erschließen von Wissen unserer Schüler heute nicht anders zu verlaufen hat, als jenes der Menschen insgesamt. Ein typisches Beispiel für diese Genese ist, dass die Vakuumpumpe im ganzen Lehrstück erst an jener Stelle auftaucht, nachdem sie im historischen Verlauf (von Otto von Guericke) auch wirklich erfunden wurde, dies obwohl der Vorschlag eine solche zu verwenden möglicherweise von Schülern schon früher gefordert wurde. Taucht die Vakuumpumpe im Unterricht zu früh auf, werden wichtige Erkenntnisschritte vorweggenommen, was die Kontinuität des Lernprozesses und die Dramaturgie des Lehrstücks stört.

7. Kommentar zur Lehrplanpassung

Das Lehrstück *Pascals Barometer* passt hervorragend in den Lehrplan der Hydrostatik, die im Schweizer Kanton Bern im 9. Schuljahr vorgesehen ist. Die vorgegebenen Themen „Gewichtskraft“, „Druckbegriff“, „Kolbendruck“, „Schweredruck“, „hydrostatisches Prinzip“ und „Luftdruck“ sind allesamt Gegenstand des Lehrstücks. Allerdings liegt dabei das Schwergewicht nicht auf der formalen Behandlung, sondern auf der inhaltlichen Auseinandersetzung (auf der Bedeutungsebene) mit diesen Begriffen. Um den Druckbegriff umfassen zu bilden, sollten aber zum Lehrstück folgende Aspekte ergänzt werden:

- Druck als skalare Größe und Druckkraft als senkrecht auf Oberflächen gerichtete Größe
- Prinzip der kommunizierenden Gefäße und hydrostatisches Paradoxon
- Quasi-Inkompressibilität von Flüssigkeiten und Pascalsches (hydrostatisches) Prinzip
- Druckeinheiten (Pascal, Bar, mmHg, Torr, PSI)

Neben diesen fachinhaltlichen Themen setzen sich die Schüler implizit auch mit Wissenschaftsgeschichte und mit wissenschaftstheoretischen Fragen zur Bildung, Validierung und Begrenztheit von wissenschaftlichen Paradigmen auseinander. Das Miterleben und Durchdenken eines Paradigmenwechsels relativiert die Absolutheit wissenschaftlicher Konzepte, zeigt deren Dynamik und deren kulturelle Prägung auf. Die Schülerinnen und Schüler lernen ferner auch die Bedeutung und den Einsatz des physikalischen Experimentes innerhalb des Erkenntnisprozesses kennen, vorerst allerdings erst in einer recht eng geführten Art.

8. Stichwort „Lehrkunstdidaktik“
Die von Hans Christoph Berg und Theodor Schulze ab Mitte der 1980er-Jahre entwickelte Lehrkunstdidaktik (vgl. Berg/Schulze 1995) basiert auf Martin Wagenscheins genetischer Methode und seinen exemplarischen, für die Fächer Mathematik und Physik skizzierten Unterrichtsbeispielen. Sie befasst sich mit wissenschaftlich oder kulturell bedeutenden Ereignissen, welche die

Sicht auf Kultur, Kunst und Wissenschaft maßgeblich verändert und beeinflusst haben und bis heute gelten. Im Lehrstückunterricht werden die Schülerinnen und Schüler in die Ausgangslage früherer Entdecker, Urheber oder Autoren versetzt, von welcher aus sie „nach-entdeckend" die Wege zu einer Entdeckung, einer Erfindung oder einem geschaffenen Werk im eigenen Lern- und Bildungsprozess erleben (Wildhirt 2008, 63). Ein Lehrstück ist eine in sich geschlossene mehrdimensional oder interdisziplinär angelegte Unterrichtseinheit, die einen vollständigen Lernzyklus umfasst (vgl. Übersicht auf www.lehrkunst.ch). Die Lehrkunstdidaktik ist den bildungstheoretischen Unterrichtskonzeptionen zuzuordnen (Klafki ab 1959; Berg/Gerwig/Wildhirt 2013, 16f), sie ist gleichzeitig tief in den Klassikern der Pädagogik verwurzelt. Lehrstückunterricht ist gleichermaßen erfahrungsorientiert, entdeckungsorientiert und handlungsorientiert (vgl. Wildhirt/Jänichen/Berg 2015).

Literatur

Aeschlimann Ueli (1997): *Pascals Barometer*. In: Hans Christoph Berg/Theodor Schulze (Hrsg.) (1997): Lehrkunstwerkstatt I. Didaktik in Unterrichtsexempeln. Luchterhand. Neuwied. S. 90-116.

Berg, Hans Christoph; Schulze, Theodor (1995): *Lehrkunst. Lehrbuch der Didaktik.* Luchterhand. Neuwied.

Berg, Hans Christoph (2009): *Die Werkdimension im Bildungsprozess. Das Konzept der Lehrkunstdidaktik; Lehrkunstdidaktik, Band 1*. hep-Verlag. Bern.

Berg, Hans Christoph; Gerwig, Mario; Wildhirt, Susanne: (2013): *Lehrkunstdidaktik 2013. Weiter auf dem Weg zu einer konkreten und allgemeinen Bildungsdidaktik.* In: Zierer, Klaus (Hrsg.): *Jahrbuch für Allgemeine Didaktik 2013.* Schneider Verlag Hohengehren. Baltmannsweiler. S. 11-31.

Eyer, Marc; Aeschlimann, Ueli (2013): *Pascals Barometer – frei nach Martin Wagenschein. Lehrkunstdidaktik, Band 8.* hep-Verlag. Bern.

Galilei, Galileo (2004): *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend: erster bis sechster Tag (1638).* Harry Deutsch (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 11). Frankfurt/Main.

Klafki, Wolfgang ([6]2007): *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik*. Beltz&Gelberg. Weinheim.

Mach, Ernst (2006): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. VDM. Saarbrücken.*

Simonyi, Károly ([3]2004): *Kulturgeschichte der Physik, von den Anfängen bis heute*. Harry Deutsch. Frankfurt/Main.

Wagenschein, Martin (2002): *Erinnerungen für morgen. Eine pädagogische Autobiographie.* Beltz. Weinheim.

Walker, Gabrielle (2007): *Ein Meer von Luft*. Berlin Verlag. Berlin.

Wildhirt, Susanne; Jänichen, Michael; Berg, Hans Christoph (2015): *Lehrstückunterricht.* In: Wiechmann, Jürgen; Wildhirt, Susanne (Hrsg.): *Zwölf Unterrichtsmethoden. Vielfalt für die Praxis.* Beltz-Verlag. Weinheim. S. 111-128.

Zum Autor

Prof. Dr. Dr. Marc Eyer ist Dozent für Interdisziplinarität und Bereichsleiter für Fachdidaktik an der Pädagogischen Hochschule in Bern sowie Physiklehrer am Gymnasium Neufeld in Bern. Er promovierte 2004 an der Universität Bern in Physik und 2013 an der Universität Marburg in Erziehungswissenschaften. Seit 2001 arbeitet er für die Weiterentwicklung und Ausbreitung der Lehrkunstdidaktik.